بهینه‌سازی شبکۀ توزیع آب با الگوریتم ژنتیک موجود در مدل Water Gems (مطالعه موردی: شهر رویدر استان هرمزگان)*

(یادداشت پژوهشی)

سعید خلیفه [۱]	غلامعباس بارانی[۲]	وحید خلیفه[۳]	محمد ذونعمت کرمانی[٤]

چکیده *بیشترین هزینه پیش‌بینی برای یک شبکۀ توزیع آب، در مقایسه با بخش طراحی و نظارت به امور اجرایی آن پروژه مربوط می شود. اگر هدف کاهش هزینه باشد، با کاهش هزینه لوله‌های مورداستفاده در شبکه و فشار استاندارد آب در گره‌ها بخشی از این امر میسر می‌گردد. در این پژوهش بهینه‌سازی بر اساس تابع هدف بر اساس کاهش هزینه، بخشی از شبکۀ توزیع آب شهر رویدر واقع در استان هرمزگان موردبررسی قرارگرفته است که با توجه به اقلیم خاص منطقه موردی (گرم و با رطوبت بالا) حائز اهمیت است. در بهینه سازی یک شبکۀ توزیع آب علاوه بر بعد مالی مسئله، باید به ابعاد دیگری همچون فشار، سرعت آب و افت در لوله‌ها که در طراحی شبکه نقش اساسی دارد توجه کرد. در پژوهش حاضر فشار مجاز و سرعت استاندارد در شبکه به‌عنوان قید محدودیت در نظر گرفته شده است. بدین منظور در این مطالعه شبکۀ توزیع با استفاده از مدل WaterGems تحلیل هیدرولیکی شده و بعد با نرم‌افزار matlab2014b کد نویسی شامل تابع هدف و بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک با توجه به مشخصه شبکه انجام‌گرفته است. در پایان بهینه‌سازی از بین تعداد تکرارهای بهینه‌سازی بر اساس تابع هدف سناریویی که ازنظر کاهش هزینه و بهبود فشار شبکه در وضعیت مطلوبی قرار داشت انتخاب شد که بعد از بهینه سازی، در حدود ۱۲ تا ۱۵ درصد از هزینه کل پروژه صرفه‌جویی صورت گرفته است.*

واژه‌های کلیدی شبکۀ توزیع آب، Water Gems ، مسائل هیدرولیکی، بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک.

Optimization of Water Distribution Systems Using Genetic Algorithms in WaterGems model (Case study: part of Rooydar)

Saeid khalifeh	Gholamabbas Barani	Vahid Khalifeh	Mohammad Zonemat-kermani

Abstract *The highest cost of forecasting for a water distribution network is compared to the design and oversight section of the project .If the goal is to reduce costs, part of this can be achieved by reducing the cost of pipes used in the network and the standard pressure of water in the nodes. This study is a multiobjective optimization function that will be executed in Part of the water distribution network of the Rooydar city in Hormozgan. In optimization of water distribution network, In addition to financial problems, Should be noted to other aspects such as pressure and velocity of water in pipes which have key roles in network design. In the present study, the permitted pressure and standard speed in the network are considered as limitation constraints .For this purpose, in this study, the distribution network using the WaterGems model has been analyzed for hydraulic analysis, and then with coding software matlab2014b including target function and optimization by genetic algorithm according to the network characteristic. At the end of the optimization, Based on the dual objective function, in terms of cost reduction and improve network Pressure, a Scenario with good condition was chosen. This scenario caused a 12-15% reduction in costs.*

Key Words Optimization, Water Distribution Network, Genetic Algorithm, Water GEMS.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۹٦/۱۱/۱ و تاریخ پذیرش آن ۹۸/۷/۲٤ می‌باشد.

(۱) نویسندۀ مسئول، دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد.	**Email:** Khalife_saeed@yahoo.com

(۲) استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکدۀ فنی ومهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

(۳) استادیار، دانشکدۀ عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان.

(٤) دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

مقدمه

شبکه‌های توزیع آب شهری ازجمله زیرساخت‌هایی هستند که با توجه به هزینه‌های بالایی که در زمینه‌های ساخت، نگهداری و مصالح دارند، موردتوجه پژوهشگران مهندسی قرارگرفته‌اند. طیف وسیعی از تحقیقات صورت گرفته در زمینه بهینه‌سازی شبکه آب‌رسانی به کم کردن هزینه اختصاص‌یافته است. طراحی بهینه شبکه‌های آب‌رسانی شهری از موضوعات مهمی است که در این سال‌ها در صنعت آب مطرح بوده است.

اولین قسمتی که در این پروسه مطرح می‌شود، روش تحلیل شبکه است. منظور از روش تحلیل این است که با داشتن مشخصات و ابعاد اجزای شبکه بتوانیم دبی در لوله‌ها، بار هیدرولیکی در گره‌ها و غیره را محاسبه نماییم. قسمت دوم عبارت است از در نظر گرفتن شبکه آب‌رسانی در شرایط بحرانی محتمل برای شبکه و کنترل اینکه آیا می‌توان از عملکرد آن در این شرایط مطمئن بود یا خیر. قسمت سوم به‌کارگیری روش‌های مناسب برای بهینه‌سازی است.

در این پژوهش با تکیه بر مدل الگوریتم ژنتیک و تحلیل شبکه با نرم‌افزار Water Gems، از آن برای بهینه‌سازی شبکۀ توزیع آب شهر رویدر استفاده‌شده است.

طراحی شبکۀ توزیع آب بر اساس مبانی زیر صورت می‌پذیرد:

۱-جمعیت شهر و تراکم جمعیت ۲- سرانه آبی شهر موردمطالعه ۳- فشار مجاز موردنیاز شبکه ٤- سرعت آب در لوله‌ها ٥- تناسب طرح با ویژگی‌های توپوگرافی منطقه ٦- اطمینان از کارکرد آن

با مروری بر مطالعات گذشته، دندی و همکاران (۱۹۹٦)، روشی را ارائه نمودند که در آن از الگوریتم ژنتیک به‌طور تکامل‌یافته‌تری استفاده می‌شد. آن‌ها در این روش از کد گذاری خاکستری استفاده کردند و عملگر جهش الگوریتم ژنتیک را به‌صورت تابع گوسی در نظر گرفتند. او برای نشان دادن مزایای این روش نسبت به روش‌های قبلی، شبکۀ توزیع آب شهر نیویورک را مورد بهینه‌سازی قرار داد، نتایج محاسبات نمایانگر عملکرد بهتر این روش نسبت به روش الگوریتم ساده و روش‌های قبلی بود [10].

آلپرویتز و شامیر (۱۹۹۷)، از یک گرادیان برنامه‌ریزی خطی (LPG) در بهینه‌سازی شبکۀ توزیع آب استفاده کردند. در این طرح طول لوله و قطر لوله به‌عنوان متغیرهای طراحی بکار گرفته شد [9].

کاپلان و همکاران (۲۰۰۳)، تولسون و همکاران (۲۰۰٤) و بابایان و همکاران (۲۰۰٤)، روش‌های بهینه‌سازی چندمنظوره شبکه‌های توزیع آب به روش الگوریتم ژنتیک را ارائه نمودند [11,12,13].

بهزاد یان و اردشیر (۲۰۰۹)، طرح نمو نه‌گیری چندمنظوره برای کالیبراسیون شبکه‌های توزیع آب با استفاده از الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی را ارائه کردند [۷].

کورکانا و همکاران (۲۰۱٦)، الگوریتم بهینه‌سازی جهت ایجاد مناطق محدوده متمرکز در یک سیستم توزیع آب را در نظر گرفتند[15].

محمدرضا پور و همکاران (۲۰۱٦)، بهینه‌سازی قطر لوله‌های شبکه آب‌رسانی شهری با استفاده از الگوریتم ژنتیک سریع آشفته و کرم شب‌تاب در مدل Relopt را ارائه داد [۸].

لیون و همکاران (۲۰۱۷)، بهینه‌سازی انرژی جریان‌های عرضه‌شده از ایستگاه‌های پمپاژ چندگانه در شبکه‌های توزیع آب را ارائه دادند[16].

لیما و همکاران (۲۰۱۸)، طراحی مطلوب شبکه‌های آب‌رسانی با استفاده از یک روش بهبود انرژی را موردمطالعه قرار دادند[17]. با توجه به تحقیقات صورت گرفته ونیز با توجه به سرعت و دقت بالاتر روش الگوریتم ژنتیک نسبت به سایر روش‌ها، این الگوریتم جهت بهینه‌سازی و نرم‌افزار Water Gems جهت تحلیل شبکه مورداستفاده قرار گرفت.

در این پژوهش بهینه‌سازی قسمتی از شبکهٔ توزیع آب شهر رویدر ا ستان هرمزگان با اقلیم خاص (گرم و رطوبت زیاد) در شـــرایط واقعی بر اســـاس هزینه کل سیستم با مدل مذکور صورت گرفته است.

بهینه‌سازی توسط این مدل با هدف برقراری تعادل بین دو پارامتر سود و هزینه انجام می‌گیرد، بدین منظور یک بهینه‌سازی چندمنظوره است. برای اعمال محدودیت‌های فیزیکی و طبیعی، قیود موجود به تابع هدف افزوده‌شده‌اند.

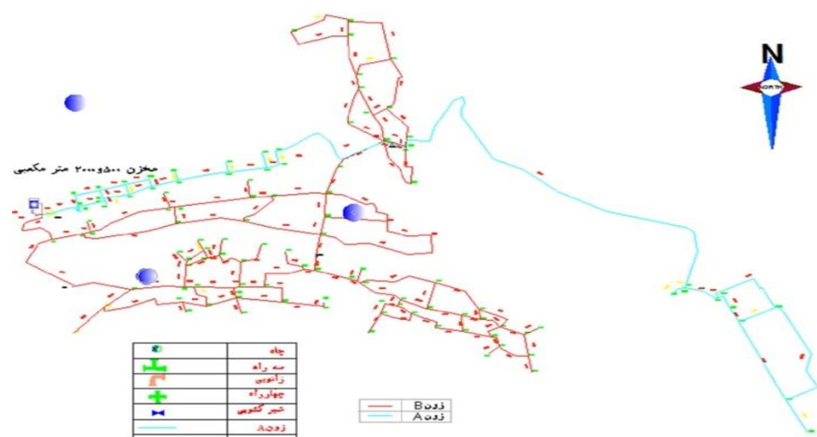
مواد و روش‌ها

محدوده مطالعاتی در این پژوهش، شـهر رویدر یکی از شهر ستان‌های استان هرمزگان است که در شمال غربی استان هرمزگان واقع‌شده است. (شکل ۱)

این شهرستان از جنوب به شهر بندرعباس از غرب به بندر خمیر و از شمال به استان فارس و از غرب به شهر رویدر محدود می‌شود. شهر رویدر در فاصلهٔ حدود ۱۵۰ کیلومتری شمال غربی بندرعباس قرارگرفته و از طریق جادهٔ آسفالت به آن متصل می‌گردد. تأسیسات موجود آب مشروب رویدر از ۳ حلقه چاه عمیق تجهیز شده، دو دستگاه مخزن زمینی سنگی- سیمانی به ظرفیت ۱۰۰ و ٤۰۰ مترمکعبی، یک دستگاه مخزن زمینی بتنی جهت جمع‌آوری و ذخیره آب استحصالی از چاه‌ها به ظرفیت ۵۰۰ مترمکعب، خط انتقالی به طول تقریبی ۳ کیلومتر و حدود ۲۸ کیلومتر شبکه توزیع تشکیل‌شده است. (شکل ۲)



شکل ۱ منطقه مطالعاتی شهر رویدر استان هرمزگان



شکل ۲ شبکهٔ توزیع آب شهری رویدر [۳]

لوله‌های شبکه توزیع از جنس آزبست سیمان و پلی‌اتیلن و فولادی از قطرهای ٦۳ الی ۲۵۰ میلی‌متر تشکیل شده که این لوله‌ها به‌طور نامنظم و غیراصولی و در حاشیه‌های شهر اکثراً به‌صورت انشعابی به هم اتصال داده‌شده است.

درمجموع تأسیسات موجود دارای معایبی از قبیل اجرای غیراصولی شبکه و متعادل نبودن دبی و فشار در سیستم و نحوهٔ اتصال لوله‌ها به هم که به‌صورت انشعابی است، می‌باشد.

در شرایط حاضر ۳ حلقه چاه شماره ۱ و ۲ و ۳ آب موردنیاز شهر رویدر را تأمین می‌نمایند، (شکل ۳) مشخصات این منابع در جدول (۱) ارائه گردیده است، در ضمن تأمین آب فضای سبز شهر رویدر توسط چشمه‌ها انجام می‌گیرد.

جدول ۱ مشخصات منابع تأمین آب شهر رویدر

ردیف	نام چاه	X(utm)	Y(utm)	آبدهی (lit/s)
۱	چاه ۱	۳٤۳۸۹۹	۳۰۳۹۰۹۰	۲
۲	چاه ۲	۳٤۳۰٦٤	۳۰۳۸۷۵۳	۳
۳	چاه ۳	۳٤۱۸۵۷	۳۰۸۸۸۹۳	۷

مخازن موجود مربوط به شهر رویدر شامل سه باب مخزن زمینی شامل مخزن ۱۰۰ و ٤۰۰ و ۵۰۰ مترمکعبی در داخل شهر است آب چاه‌های ۱ و ۲ ابتدا به مخزن ۵۰۰ مترمکعبی وارد می‌شود. این مخزن در سال ۱۳۸٤ ساخته‌شده است. مخازن ٤۰۰ و ۱۰۰ مترمکعبی به ترتیب در سال‌های ۱۳٦٤ و ۱۳۵۹ ساخته‌شده‌اند و به بهره‌برداری رسیده‌اند. لازم به ذکر است تعداد مشترکین شهررویدر در حال حاضر حدود ۱۷۰۰ اشتراک است.



شکل ۳ محل چاه‌های شهر رویدر

جدول ۲ مصارف سرانه کل آب شهر رویدر در طی سال‌های دوره طرح [۳]

مصرف سال	خانگی (Lpcd)	اداری (Lpcd)	تجاری (Lpcd)	تلفات (Lpcd)	جمع کل (Lpcd)
۱۳۹۵	۱۲۵/۹٦	۱۱/۳٦	٦/۲٦	۲۷/۲	۱۷۱/٦
۱٤۰۰	۱۲۷/۳٦	۱۲/۱٦	۷/۱٦	۲۷/۵	۱۷٤/۸٤
۱٤۰۵	۱۲۸/۷٦	۱۳/۰٦	۸/۰٦	۲۷/۷۵	۱۷۸/۰٦
۱٤۱۰	۱۳۰/٦	۱۳/۹٦	۸/۹٦	۲۷/۹۵	۱۸۱/۲۵
۱٤۱۵	۱۳۵/۸۷	۱۵	۱۰	۲٤/۱۳	۱۸۵

درنهایت میزان کل آب مصرفی شهررویدر با توجه به مصارف بهدست‌آمده در طی سال‌های دوره طرح به شرح جدول (۲) برآورد می‌گردد.

نتایج به‌دست‌آمده از جدول بالا نشان می‌دهد که میزان مصرف آب شهر رویدر در سال افق طرح (۱٤۱۵) با توجه به آمار اخذشده و با توجه به متوسط استاندارد وزارت نیرو حدود ۱۸۵ لیتر نفـر در روز است.

ساخت مدل شبکه آب‌رسانی در نرم‌افزار واترجمز

نرم‌افزار واترجمز با قابلیت اتصال به نرم‌افزارهای Arc GIS، اتوکد و نرم‌افزارهای شرکت مایکروسافت یک پل ارتباطی کامل در زمینه طراحی شبکه‌های آب‌رسانی را به وجود آورده که ضمن قابلیت بالا در شبیه‌سازی سیستم شامل انواع لوله‌ها، مخازن، اتصالات و کلیه جزئیات فیزیکی و شیمیایی موجود، توانایی مدل کردن شبکه آب‌رسانی تا حد امکان نزدیک به واقعیت را به کاربر می‌دهد. نرم‌افزار واترجمز به مدل‌سازی سیستم‌های انتقال آب تحت‌فشار اختصاص دارد.

مراحل تجزیه‌وتحلیل مدل با استفاده از روش‌های بهینه‌ساز

جمع‌آوری اطلاعات سیستم که شامل تعیین اجزاء شبکه آب‌رسـانی مانند تعداد لوله‌ها، اتصـالات، پمپ، منبع و غیره و همچنین مشخص کردن مکان آن‌ها است.

۱. استخراج داده‌های طول، قطر لوله، سرعت جریان و فشار اولیه ازواترجمز و وارد کردن به مدل الگوریتم‌های بهینه‌سازی و سپس استخراج گزینه‌های بهینه قطر لوله در اجراهای مکرر و کنترل آن‌ها جهت ورود به واتر جمز.
۲. اجرای مدل و به دسـت آوردن بهترین گزینه‌های خروجی.
۳. بررسـی تفاوت‌های نتایج مختلف و تحلیل دلایل برتری این گزینه‌ها نسبت به شبکه‌های دیگر.
٤. تجزیه‌وتحلیل نتایج و خروجی‌های مدل از دیدگاه مهندسی و ارائه پیشنهادها.

پس از مدل کردن تمامی اجزاء شبکه، لیست لوله‌های سیستم که بخش اساسی هزینه و نقش اصلی در تعیین میزان افت فشار در شبکه را ایفا می‌کنند، به مدل الگوریتم بهینه‌ساز ایجادشده در نرم‌افزار «متلب» وارد می‌شود.

مدل طراحی‌شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک، تمامی گزینه‌های ممکن بهینه را تعیین کرده و بهترین گزینه با مقایسه مهندسی انتخاب می‌شود (کنترل اجرایی بودن طرح و رعایت قطر لوله در مسیر لوله‌های فرعی به اصلی). بهترین گزینه بهینه ممکن خروجی مدل دوباره به مدل واترجمز وارد شده و صحت محاسبات پس از اجرای شبکه، تأیید می‌شود.

سپس با استفاده از توانایی این نرم‌افزار در برآورد ریالی پروژه، کمترین هزینه در بهترین شرایط هیدرولیکی شبکه آب‌رسانی با نگاه کارشناسی انتخاب خواهد شد.

هیدرولیک خطوط انتقال و شبکهٔ توزیع و نحوهٔ محاسبه افت فشار در مسیر

اصولاً بین سه مشخصه مهم هیدرولیکی خط لوله سرعت، قطر وافت حرکت سیالات در لوله‌ها رابطه زیر برقرار است:

$$h = f(d,v) \qquad (1)$$

در این رابطه:h ارتفاع نظیر افت و d قطر لوله و v سرعت جریان

هنگامی‌که انرژی پتانسیل سیال در ابتدای لوله بیش از انتهای آن باشد سیال در لوله به جریان خواهد افتاد. اختلاف انرژی پتانسیل لازم جهت حرکت سیال را می‌توان به روش‌های گوناگون محاسبه نمود.

عموماً مبنای این روش‌ها بر پایه سـری پایه‌گذاری شده که به‌صورت فرمول ریاضی زیر بیان می‌شود:

$$Q = KS^aR^b \qquad (2)$$

در این رابطه K ضـریبی اسـت که به جنس لوله

بستگی دارد. S شیب و R شعاع هیدرولیکی است.

a و b ضرایب ثابتی هستند که در شرایط خاص سیال قابل‌محاسبه‌اند [۱].

معمولاً در محاسبات و بررسی‌های ریاضی خطوط لوله تحت‌فشار انتقال آب از فرمول هیزن ویلیامز استفاده می‌شود.

فرمول هیزن ویلیامز: از فرمول‌های نهایی که در محاسبات خطوط لوله کاربرد فراوانی دارد فرمول هیزن ویلیامز است که بر اساس تجربه به‌دست‌آمده است. در سیستم متریک به‌صورت زیر بیان می‌شود.

$$h_l = \frac{6.78V^{1.85}}{1.165CD} \quad (۳)$$

در این رابطه h_l افت فشار نظیر ارتفاع در واحد طول برحسب متر و V سرعت جریان سیال برحسب متر در ثانیه و D قطر خط لوله برحسب متر و C ضریب ناصافی دیواره لوله در فرمول هیزن ویلیامز است که با تغییر قطر و جنس لوله تغییر می‌نماید که با توجه به پوشش استانداردهای معتبر به دست می‌آید [۵].

مقدار ضریب C پیشنهادی در طرح

با توجه به میزان ضریب ناصافی لوله‌ها در طول زمان بهره‌برداری از خطوط لوله، افزایش می‌یابد و به‌طورکلی رابطه‌ای که بتواند بیانگر این تغییرات باشد در حال حاضر وجود ندارد و دانستن وضعیت تغییرات را در هر مورد بایستی توسط آزمایش‌های متعدد مشخص نمود. تغییرات ضریب C در رابطه هیزن ویلیامز به کیفیت آب مورد انتقال و شرایط هیدرولیکی جریان و جنس لوله‌ها و پوشش داخلی لوله و نوع آن بستگی دارد از عوامل مؤثر در تغییر ضریب، پوشش داخلی لوله و نوع آن است که از اهمیت خاص برخوردار است بدین معنی که کیفیت انجام پوشش و نوع آن می‌تواند تقریباً این ضریب را در طول زمان ثابت نگه دارد و تنها سبب ایجاد افت‌وخیزهای نسبتاً جزئی می‌شود.

بنابراین، عدد مشخصی تاکنون برای این ضریب تعیین نشده است. با توجه به منابع مختلف ضریب C برای لوله‌های پلی‌اتیلن با توجه به صافی لوله ۱۳۰ منظور گردیده است [٦].

طراحی هیدرولیکی شبکهٔ توزیع موجود شهر روید مطابق جدول (۳) بیان شده است.

جدول ۳ مشخصات لوله‌های شبکهٔ توزیع آب شهر رویدر قبل از بهینه‌سازی [۳]

آنالیز اقتصادی طراحی قبل از بهینه‌سازی			
قطر لوله (میلی‌متر)	طول لوله (متر)	قیمت هر متر (ریال)	قیمت کل (ریال)
۷۵	۳۹۷۲	۸۷٦٤٤	۳٤۸۱۲۱۹٦۸
۹۰	۳۳۸	۱۱٦۸۰۸	۳۹٤۸۱۱۰٤
۱۱۰	۳٤۱۵	۱٦۱٦٤٦	۵۵۲۰۲۱۰۹۰
۱٦۰	۱٦۰٦	۳۱٦۵۲۲	۵۰۸۳۳٤۳۳۲
جمع			۱٤٤۷۹۵۸٤۹٤

با استفاده از مدل‌سازی در WaterGEMS و بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک علاوه بر تحلیل هیدرولیکی، شبکهٔ توزیع آب را به‌صورت دوهدفه بهینه‌سازی کرده‌ایم. استفاده از این روش علاوه بر اینکه زمان برای رسیدن به جواب بهینه را کاهش می‌دهد ازلحاظ دقت نیز عملکرد بالایی دارد.

هدف از بهینه‌سازی سیستم، بالا بردن سود و پایین آوردن هزینه‌ها است.

در مدل مذکور فقط عامل سود فشار در بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شود. سود فشار به‌وسیله تغییر فشار گره در طراحی اندازه‌گیری می‌شود. اگر فشار یک گره کم باشد، ظرفیت سیستم بالا رفته و درنتیجه سود نیز بالا می‌رود.

تابع هدف و قیود

الف- تابع هدف در این تحقیق کمینه کردن هزینه‌های شبکهٔ توزیع است که در رابطه (۱) نشان داده شده است:

$$\min \cos t = \sum_{i \in D} \sum_{j=1}^{np} C_i L_{ij}$$
$$D = (d_i, i = \ldots nd)$$
(٤)

C_i = هزینه واحد طول (با توجه به وزن واحد طول لوله)

L_{ij}= طول لوله (مترلوله)

nd = قطر لوله در دسترس (قطرهای استاندارد پلی‌اتیلن)

np = تعداد لوله‌های درون شبکه

ب- قیود: ۱. قطرهای ممکن برای لوله‌ها:

$$d_{min} \leq d_i \leq d_{max}$$
$$i = 1, \ldots, np$$
(٥)

۲. فشار کمینه موردنیاز و فشار بیشینه درنظرگرفته شده در ریسک شکست، کمینه فشار حدود ۱۵۰ کیلو پاسکال در نقاط مصرف است و بیشینه فشار در لوله‌ها با توجه به فشار قابل‌تحمل لوله مورداستفاده تعیین می شود (قید فشار).

$$P_{rmin} \leq P_{ri} \leq P_{rmax}$$
$$j = 1, \ldots, n$$
(٦)

n : تعداد گره‌های با فشار موردنیاز مشابه ک به‌منظور ارزیابی تغییر فشار

۳. محدوده سرعت در لوله‌ها (لانسی و میبس ۱۹۸۹)

این محدوده در لوله‌های آب‌رسانی حدود کمینه ۰٫۵ متر بر ثانیه جهت جلوگیری از رسوب‌گذاری و ایست جریان و بیشینه ۲ متر بر ثانیه جهت جلوگیری از آسیب‌های فرسایش و تشدید امواج و ضربه قوچ است (قید سرعت)

$$V_{min} \leq V_{ri} \leq V_{max}$$
$$i = 1, \ldots, np$$
(٧)

الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یک روش جستجوی تصادفی جامع است که اصول آن تقلیدی از تکامل بیولوژیکی و طبیعی موجودات زنده است که با به‌کارگیری اصل بقاء اصلح بر روی جمعیتی از جواب‌های امکان‌پذیر، جواب‌های بهتری را می‌یابد. روند کلی حل مسائل توسط الگوریتم ژنتیک این است که در مرحله نخست جمعیتی از کروموزوم‌ها به تعداد معین تولید می‌شود. جمعیت اولیه معمولاً به‌صورت تصادفی ایجاد می‌گردد. در مرحله بعد هر یک از جواب‌ها به‌صورت رشته‌هایی که کروموزوم نامیده می‌شود کدگذاری می‌شوند. کروموزوم‌ها را در حالت کدگذاری شده نماد ژنی و مقادیر حقیقی متناظر کروموزوم‌ها را نماد معرف می‌نامند. عمل جستجو بر روی نمادهای ژنی صورت می‌گیرد، به‌استثنای مواردی که ژن‌های مقدار واقعی مورداستفاده قرار می‌گیرد. پس از کدگذاری کروموزوم‌های میزان اصلح بودن هر یک از اعضا جمعیت بایستی ارزیابی گردد. مقدار کدگشایی‌شده کروموزوم‌ها در قلمرو متغیر تصمیم‌گیری، امکان تعیین عملکرد افراد عضو جمعیت را فراهم می‌کند. این کار توسط تابع هدف مسئله که مشخص‌کننده میزان اصلح بودن و کارایی هر یک از افراد در محدوده موجه مسئله است انجام می‌شود. سپس به هر یک افراد جمعیت یک مقدار اصلحیت متناسب با جایگاه آن فرد در بین افراد جمعیت برای بهینه کردن تابع هدف، اختصاص داده می‌شود؛ یعنی افرادی که بیشتر تابع هدف را بهینه (بسته به نوع مسئله، ماکزیمم یا مینیمم) می‌کنند دارای مقادیر اصلحیت بیشتری نسبت به بقیه هستند. در گام بعدی پروسه افرادی که بایستی نسل بعدی از آن‌ها به وجود آید انتخاب می‌شوند. مقدار اصلحیت به‌دست‌آمده از گام قبلی یکی از پارامترهای ضروری پروسه انتخاب افراد نسل آینده است. به عبارتی افرادی که دارای صلاحیت بیشتری نسبت به سایر افراد جمعیت باشند شانس انتخاب بیشتری خواهند داشت. پس از مرحله انتخاب افراد عملگرهای آمیزش و جهش بر جمعیت اعمال می‌شود. این عملگرها به ترتیب با تعویض اطلاعات ژنتیکی بین افراد جمعیت و تغییرات اطلاعات ژنتیکی افراد، ژن‌های کروموزوم‌ها را طبق برخی از قوانین احتمال طوری تغییر می‌دهند که در کل میانگین برازندگی افراد جمعیت در نسل بعدی بهبود یابد. سپس کروموزوم‌ها کدگشایی‌شده و مقادیر تابع هدف به ازای هر یک از آن‌ها ارزیابی

می‌گردد تا بر اساس مقادیر اصلحیت، امکان انتخاب کروموزوم‌ها برای ایجاد نسل آینده فراهم شود. این روند در نسل‌های متوالی تکرار می‌شود. طی این فرایند انتظار می‌رود که میانگین کارایی و برازندگی افراد جمعیت افزایش یابد، چراکه افراد خوب باقی می‌مانند و ویژگی‌های آن‌ها جهت تعیین افراد نسل بعدی مورداستفاده قرار می‌گیرد و افراد دارای برازندگی پایین از پروسه خارج شده و از بین می‌روند. الگوریتم ژنتیک زمانی که برخی معیارهای خاص مانند تعداد معینی تولید نسل و یا اختلاف انحراف معیار عملکرد افراد جمعیت به حد مقرر برسد به پایان می‌رسد و بهترین رشته را بازمی‌گرداند [۷ و ۲].

نتایج و بحث

در این پژوهش بهینه‌سازی بر اساس روش حاضر و بر اساس یک تابع هدف انجام شد. بخشی از شبکهٔ توزیع آب شهر رویدر که در این پژوهش موردبررسی قرارگرفته است، مطابق آنالیز صورت گرفته شبکه تحلیلی شامل ٧٦ لوله و ٧٣ گره است که پس از طراحی و مدل‌سازی در Water GEMS و سپس با کد نویسی متلب به‌منظور بهینه‌سازی به‌وسیله الگوریتم ژنتیک استفاده شده است.

اشاره به این نکته ضروری است که الگوریتم ژنتیک زمانی صحیح عمل می کند که پارامترهای آن به‌طور صحیح انتخاب شوند. پارامترهایی که بیشترین تأثیر را در عملکرد ژنتیک دوهدفه دارند عبارت‌اند از: مقدار عددی حداکثر نقطه شروع و اندازه جمعیت که با افزایش آنها تعداد جواب‌های حاصله بیشتر خواهد بود و فاکتور جریمه.

در مورد پارامتر مقدار عددی حداکثر نقطه شروع بهتراست اول از اعداد ۱ و ۲ شروع کرده و در هر تکرار با توجه به اندازه جمعیت، مقدار آن افزایش داده شود. در پارامتر اندازه جمعیت نیز ابتدا از اعداد کمتر مانند ۱۵۰ شروع کرده و در تکرارهای بعدی مقدار آن را افزایش داده می‌شود تا تعداد جواب‌های به‌دست‌آمده افزایش یابد. جدول (۳) به این پارامترها و عملکرد آن‌ها اشاره می‌کند. هرقدر عدد اختصاص داده شده به پارامتر جریمه بزرگ‌تر باشد، الگوریتم ژنتیک بر روی جواب‌های عملی که از محدودیت‌های تعیین‌شده تجاوز پیدا نمی‌کنند، تمرکز خواهد داشت و اگر این مقدار کمتر باشد (۵۰۰۰۰ یا کمتر)، جواب‌ها در مرز عملی و غیرعملی خواهند بود. منظور از جواب عملی، جوابی است که منطقاً قابل‌اجرا باشد.

جدول ٤ دامنه پارامترهای مورداستفاده در الگوریتم ژنتیک

پارامتر	اصطلاح انگلیسی	حد پایین	حد بالا
مقدار عددی حداکثر نقطه شروع	Maximum Era Number	۱	۱۰
مقدار عددی نسل اول	Era Generation Number	۱	متناسب با دیگر معیارهای عددی بزرگ‌تر از ۱
اندازه جمعیت	Population Size	۵۰	۱۵۰
احتمال قطع شدن	Cut Probability	٪۱	٪۱۰
احتمال اتصال	Splice Probability	٪۵۰	٪۹۰
احتمال جهش	Mutation Probability	٪۱	٪۱۰
کاوش تصادفی	Random Seed	۰	۱
فاکتور جریمه	Penalty Factor	۱۰۰۰	با بزرگ‌تر شدن این معیار محدودیت‌ها تأثیر بیشتری خواهند داشت

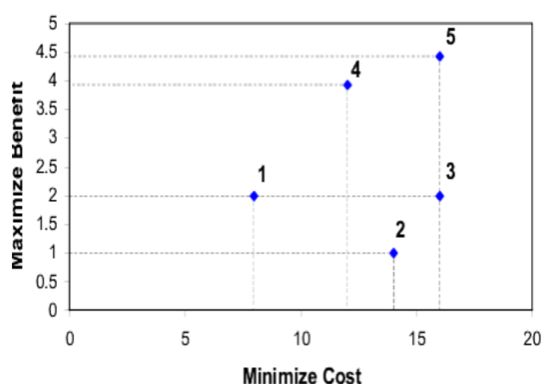
توابع هدف الگوریتم ژنتیک ازلحاظ همگرایی آزموده شدند. نتایج نشان داد که هر دو تابع هدف

درنهایت به همگرایی رسیدند و نتیجه آزمون مثبت بود. در الگوریتم ژنتیک پارامترهایی را با توجه به نوع مسئله باید فرض کنیم و با توجه به تعداد تکرار و ران گرفتن در متلب میزان مشخص را وارد کنیم.

با توجه به ران گرفتن در متلب فرضـیات زیر در مسئله موردمطالعه در نظر گرفته‌شده است.

مجموعه جواب بهینهٔ پارتو

زمانی که بیش از یک هدف در طراحی وجود داشته باشد، انتخاب بهترین گزینه کار مشکلی است چون ممکن است در یک هدف گزینه بهتری وجود داشته باشد که با توجه به تابع هدف دیگر مناسب به نظر نرسد. برای مثال در شکل (٤) که مجموعه‌ای از گزینه‌های معتبر و نامعتبر ارائه شده‌اند. گزینه‌های ۱ و ٤ و ۵ در مقایسه با گزینه‌های ۲ و ۳ هزینه کمتر و سود بیشتری را دارد، بدین معنی که گزینه‌های ۱ و ٤ و ۵ بهتر از مجموعه گزینه‌های ۲ و ۳ می‌باشند.



شکل ٤ مقایسه گزینه‌های معتبر و نامعتبر

گزینه معتبر به راه‌حلی اطلاق می شود که علاوه بر اینکه در یک تابع هدف نتیجه بهتری را پیشنهاد می‌دهد، توانائی ارضای قیود تابع هدف دیگر را نیز داشته باشد.

این بدین معنی است که این گزینه هم هزینه کمتری داشته و هم ازلحاظ بهبود فشار عملکرد مناسبی داشته باشد.

زمانی که تابع هدف چندمنظوره باشد مدل مورداستفاده چندین گزینه بهینه را پیشنهاد می‌دهد، بنابراین زمانی که تابع هدف چندمنظوره باشد انتخاب بهترین و مناسب‌ترین گزینه بنا بر صلاحدید طراح صورت می‌گیرد.

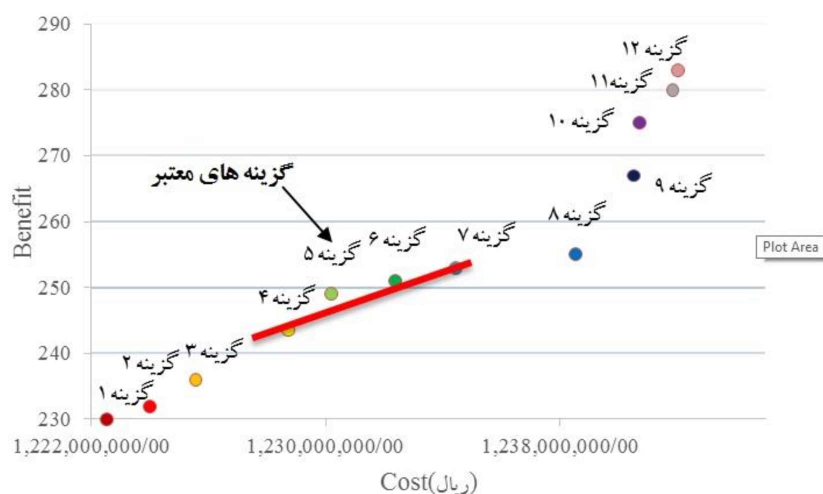
همان‌طور که گفته شد با توجه به بهینه‌سازی، تعداد ۱۲ گزینه جهت بهینه کردن شبکه در نظر گرفته شد که شامل قطرهای جدید برای لوله‌های شبکه می‌باشند که با انتقال داده‌ها به سناریو، نرم‌افزار قادراست تأثیر این تغییرات قطر را بر روی شبکه اعمال کند. براین اساس آنالیز اقتصادی جهت انتخاب روش بهینه، در ۱۲ گزینه صورت می‌پذیرد که در جدول (۵) ذکر گردیده‌اند.

همان‌طور که در جدول (۵) نشان داده شده است و همچنین بر اساس قیمت اولیه طرح قبل از بهینه‌سازی می‌توان به این نتیجه رسید که مبلغ کل طرح پس از بهینه‌سازی به میزان ۱۵-۱۲ درصد کاهش یافته است.

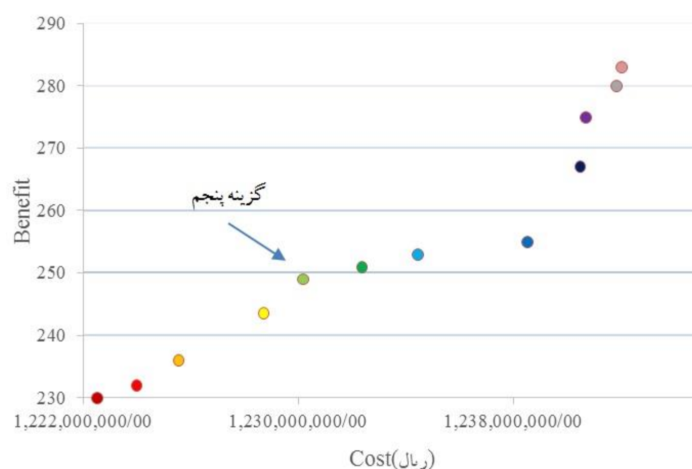
در مطالعه حاضر پس از انجام بهینه‌سازی طرح مذکور از میان آنالیزهای انجام‌شده توسط مدل تعداد چهار گزینه با توجه به درصد کاهش قیمت بیشتر نسبت به دیگر گزینه‌ها انتخاب گردید. با توجه به چند هدفه بودن بهینه‌سازی صورت گرفته و اینکه علاوه بر کاهش قیمت به‌عنوان یکی از اهداف، وضعیت بهبود فشار در شبکه به‌عنوان تابع هدف دوم مطرح است، لذا به‌منظور انتخاب گزینه بهینه از منحنی سود- هزینه استفاده‌شده است.

جدول ۵ آنالیز اقتصادی طراحی بعد از بهینه‌سازی (در ۱۲ گزینه)

۰	روش ۱			روش ۲			روش ۳			روش ۴		
قطر لوله (میلیمتر)	طول لوله (متر)	قیمت هر متر لوله (ریال)	قیمت کل (ریال)	طول لوله (متر)	قیمت هر متر لوله (ریال)	قیمت کل (ریال)	طول لوله (متر)	قیمت هر متر لوله (ریال)	قیمت کل (ریال)	طول لوله (متر)	قیمت هر متر لوله (ریال)	قیمت کل (ریال)
۷۵	۳۰۲۵	۸۷۶۴۴	۲۶۵۱۳۳۱۰۰	۳۰۲۲	۸۷۶۴۴	۲۶۴۸۶۰۱۶۸	۳۰۱۵	۸۷۶۴۴	۲۶۴۲۴۶۶۶۰	۳۲۱۰	۸۷۶۴۴	۲۸۱۳۳۷۲۴۰
۹۰	۳۵۰	۱۱۶۸۰۸	۴۰۸۸۲۸۰۰	۳۶۰	۱۱۶۸۰۸	۴۲۰۵۰۸۸۰	۳۹۶	۱۱۶۸۰۸	۴۶۲۵۵۹۶۸	۳۰۶	۱۱۶۸۰۸	۳۵۷۴۳۲۴۸
۱۱۰	۲۷۵۰	۱۶۱۶۴۶	۴۴۴۵۱۶۵۰۰	۲۷۴۵	۱۶۱۶۴۶	۴۴۳۷۱۸۲۷۰	۲۸۰۰	۱۶۱۶۴۶	۴۵۲۶۰۸۸۰۰	۲۷۵۰	۱۶۱۶۴۶	۴۴۴۵۲۶۵۰۰
۱۶۰	۱۵۰۰	۳۱۶۵۲۲	۴۷۴۷۸۳۰۰۰	۱۵۰۵	۳۱۶۵۲۲	۴۷۶۶۵۶۱۰	۱۴۸۰	۳۱۶۵۲۲	۴۶۸۴۵۲۵۶۰	۱۵۲۰	۳۱۶۵۲۲	۴۸۱۱۱۳۴۴۰
مجموع	۱۲۲۵۳۱۵۴۰۰			۱۲۳۹۹۴۹۲۸			۱۲۲۵۵۶۳۹۸۸			۱۲۲۸۷۲۰۴۲۸		
۰	روش ۵			روش ۶			روش ۷			روش ۸		
طول لوله (متر)	قیمت هر متر لوله (ریال)	قیمت کل (ریال)	قیمت هر متر لوله (ریال)	قیمت کل (ریال)	طول لوله (متر)	قیمت هر متر لوله (ریال)	قیمت کل (ریال)	قیمت هر متر لوله (ریال)	قیمت کل (ریال)	طول لوله (متر)	قیمت هر متر لوله (ریال)	قیمت کل (ریال)
۳۰۴۱	۸۷۶۴۴	۲۶۶۵۲۵۴۰۴	۸۷۶۴۴	۲۶۵۵۶۱۳۲۰	۳۰۴۱	۸۷۶۴۴	۲۶۶۵۲۵۴۰۴	۸۷۶۴۴	۲۶۵۵۶۱۳۲۰	۳۰۴۱	۸۷۶۴۴	۲۶۶۵۲۵۴۰۴
۳۳۰	۱۱۶۸۰۸	۳۸۵۴۶۶۴۰	۱۱۶۸۰۸	۳۹۱۳۰۶۸۰	۳۳۰	۱۱۶۸۰۸	۳۸۵۴۶۶۴۰	۱۱۶۸۰۸	۳۹۱۳۰۶۸۰	۳۳۰	۱۱۶۸۰۸	۳۸۵۴۶۶۴۰
۲۷۹۵	۱۶۱۶۴۶	۴۵۱۸۰۰۵۷۰	۱۶۱۶۴۶	۴۵۰۹۹۲۳۴۰	۲۷۹۵	۱۶۱۶۴۶	۴۵۱۸۰۰۵۷۰	۱۶۱۶۴۶	۴۵۰۹۹۲۳۴۰	۲۷۹۵	۱۶۱۶۴۶	۴۵۱۸۰۰۵۷۰
۱۵۴۰	۳۱۶۵۲۲	۴۸۷۴۴۳۸۸۰	۳۱۶۵۲۲	۴۸۷۷۶۰۴۰۲	۱۵۴۰	۳۱۶۵۲۲	۴۸۷۴۴۳۸۸۰	۳۱۶۵۲۲	۴۸۷۷۶۰۴۰۲	۱۵۴۰	۳۱۶۵۲۲	۴۸۷۴۴۳۸۸۰
مجموع	۱۲۳۰۱۷۶۹۸۶			۱۲۳۲۳۷۴۷۷۲			۱۲۳۴۴۴۴۷۴۲			۱۲۳۸۵۲۶۳۰۵		
۰	روش ۹			روش ۱۰			روش ۱۱			روش ۱۲		
طول لوله (متر)	قیمت هر متر لوله (ریال)	قیمت کل (ریال)	قیمت هر متر لوله (ریال)	قیمت کل (ریال)	طول لوله (متر)	قیمت هر متر لوله (ریال)	قیمت کل (ریال)	قیمت هر متر لوله (ریال)	قیمت کل (ریال)	طول لوله (متر)	قیمت هر متر لوله (ریال)	قیمت کل (ریال)
۳۱۹۵	۸۷۶۴۴	۲۸۰۰۲۲۵۸۰	۸۷۶۴۴	۲۸۱۳۳۷۳۴۰	۳۱۹۵	۸۷۶۴۴	۲۸۰۰۲۲۵۸۰	۸۷۶۴۴	۲۸۱۳۳۷۳۴۰	۳۱۹۵	۸۷۶۴۴	۲۸۰۰۲۲۵۸۰
۳۰۹	۱۱۶۸۰۸	۳۶۰۹۳۶۷۲	۱۱۶۸۰۸	۳۵۷۴۳۲۴۸	۳۰۹	۱۱۶۸۰۸	۳۶۰۹۳۶۷۲	۱۱۶۸۰۸	۳۵۷۴۳۲۴۸	۳۰۹	۱۱۶۸۰۸	۳۶۰۹۳۶۷۲
۲۸۱۰	۱۶۱۶۴۶	۴۵۴۲۲۵۲۶۰	۱۶۱۶۴۶	۴۵۱۸۰۰۵۷۰	۲۸۱۰	۱۶۱۶۴۶	۴۵۴۲۲۵۲۶۰	۱۶۱۶۴۶	۴۵۱۸۰۰۵۷۰	۲۸۱۰	۱۶۱۶۴۶	۴۵۴۲۲۵۲۶۰
۱۵۰۶	۳۱۶۵۲۲	۴۷۶۶۸۲۱۳۲	۳۱۶۵۲۲	۴۷۷۹۴۸۲۲۰	۱۵۰۶	۳۱۶۵۲۲	۴۷۶۶۸۲۱۳۲	۳۱۶۵۲۲	۴۷۷۹۴۸۲۲۰	۱۵۰۶	۳۱۶۵۲۲	۴۷۶۶۸۲۱۳۲
مجموع	۱۲۴۰۴۹۰۰۸۲			۱۲۴۰۶۸۸۵۰۵			۱۲۴۱۸۲۹۲۷۸			۱۲۴۲۰۲۳۶۴۴		



شکل ٦ پیشنهاد گزینه‌های معتبر منحنی سود- هزینه مطالعه حاضر



شکل ۷ بهترین گزینه پیشنهادی منحنی سود- هزینه مطالعه حاضر

با توجه به شکل (٥)، با بررسی گزینه های پیشنهادی با استفاده از منحنی (سود- هزینه) طبق تعریف مدل ارائه شده که تابع دو منظوره شامل بیشینه سود و کمینه هزینه بود، از بین ۱۲ گزینه ٤ گزینه به دلیل اینکه ازنظر کاهش هزینه و بهبود فشار شبکه به‌عنوان گزینه‌های معتبر انتخاب گردیدند.

با توجه به قیود و تابع دو هدفه از بین ٤ گزینه پیشنهادی باید گزینه‌ای انتخاب شود که سرعت در لوله‌ها و فشار در گره‌ها در حد استانداردهای تعریف‌شده باشد.

بدین منظور گزینه‌ای که شرایط ایده‌آل را تأمین کند یعنی حداقل فشار گره بیش از ۱۸ متر آب باشد و حداکثر سرعت در لوله کمتر از ۲،٥ متر بر ثانیه باشد را به‌عنوان گزینه برتر بهینه‌سازی قلمداد می‌کنیم.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، بهینه‌سازی شبکه آب‌رسانی شهری علاوه بر بعد مالی مسئله، به ابعاد دیگری همچون فشار، سرعت آب در لوله‌ها که در طراحی شبکه نقش اساسی

دارد توجه شد. بعد فشار و سرعت به‌عنوان قید محدودیت در نظر گرفته شد. اگر در این شبکه تابع هدف تنها بر اساس هزینه در نظر گرفته می‌شد شبکه ازلحاظ تأمین فشار مناسب در محل‌های مصرف با مشکل مواجه بود درنتیجه برای اینکه شبکه ازلحاظ هیدرولیکی نیز در شرایط مطلوب ازنظر فشار و سرعت باشد گزینه‌ای را با توجه به تابع دوهدفه و قیود انتخاب کرده‌ایم که اهداف تعیین‌شده را محقق سازند.

با توجه به شکل (٦) از بین ٤ گزینه معتبر، گزینه پنجم به دلیل برقراری تعادل بین دو پارامتر سود و فشار بهترین روش انتخاب شد. در گزینه پنجم پس از اعمال این روش در مدل و آنالیز هیدرولیکی طرح مشاهده شد که سرعت در تمامی لوله‌ها کمتر از ماکزیمم سرعت مجاز در طراحی (۲/۵ متر بر ثانیه) است. همچنین فشار در گره‌های شبکه بین ۵۰-۱۰ متر است که نشان‌دهنده ارضا شدن طرح ازلحاظ هیدرولیکی است.

در پایان بهینه‌سازی از بین چند سناریو بر اساس تابع هدف سناریوی پنجم که ازنظر کاهش هزینه و بهبود فشار شبکه در وضعیت مطلوبی قرار داشت انتخاب شد که بعد از بهینه‌سازی، در حدود ۱۲-۱۵ درصد از هزینه کل پروژه شبکه آب‌رسانی شهر روید صرفه‌جویی صورت گرفت.

مراجع

۱. منزوی، م.ت.، آب‌رسانی شهری، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ هجدهم، (۱۳۹۱).

۲. خلیفه، سعید، «بهینه سازی شبکهٔ توزیع آب با الگوریتم ژنتیک(مطالعه موردی: شهر رویدر)»، رسالهٔ کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه صنعتی باهنر کرمان، (۱۳۹۳).

۳. خلیفه، س.، مطالعات مرحله اول و دوم پروژه شبکهٔ توزیع آب شهر هماشهر، مهندسین مشاور هلیل آب کرمان، (۱۳۹۵).

٤. نظری، ع.، و میسمی، ح.، آموزش کاربردی نرم‌افزار WaterGEMS، انتشارات مرکز ملی مقاوم‌سازی ایران، چاپ اول، (۱۳۸۷).

۵. تائبی، ا.، و چمنی، م.، شبکه‌های توزیع آب شهری، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان، چاپ دوم، (۱۳۸٤)

٦. معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی- وزارت نیرو " ضوابط طراحی سامانه‌های انتقال و توزیع آب شهری و روستایی (بازنگری و تکمیل نشریه ۳-۱۱۷) "تهران، (۱۳۹۲).

۷. بهزادیان، ک.، و ارد شیر، ع.، طراحی نمونه‌برداری چند هدفه برای وا سنجی مدل شبکهٔ توزیع آب با ا ستفاده از الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی مجله آب و فاضلاب دوره ۱۹، شماره ۱، فروردین و اردیبهشت ۱۳۸۷، صفحه۲۲-۱۳، (۱۳۸۷).

۸. معین‌الدینی، ا.، محمدر ضا پور، ا .، زینلی، م. ج.، بهینه سازی قطر لوله‌های شبکه آب‌ر سانی شهری با ا ستفاده از الگوریتم ژنتیک سریع آشفته و کرم شب‌تاب در مدل Relopt مطالعه موردی: (شهرک شهرداری کرمان)، نشریه پژوهش‌های حفاظت آب‌وخاک جلد بیست و سوم، شماره چهارم، (۱۳۹۵).

9. Alperovits, E. and Shamir, U., "Design of optimal water distribution systems." *Journal of Water resources research*, Vol.13, No. 6, pp.885-900, (1977).

10. Dandy, G.C., Simpson, A.R. and Murphy, L. J., "An improved genetic algorithm for pipe network optimization", *Journal of Water Resources Research*, Vol.32, No. 2, pp.449-458, (1996).

11. Kapelan, Z., Savic, D. and Walters, G.A., "Robust least cost design of water distribution systems using GAs." Proc. Computer Control for Water Industry (CCWI), London (UK), pp.147-155, (2003).

12. Babayan, A., Kapelan, Z., Savic, D. and Walters, G., "Least-cost design of water distribution networks under demand uncertainty", *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol.131, No. 5,

pp.375-382, (2005).

13. Tolson, B.A., Maier, H.R., Simpson, A.R. and Lence, B.J., "Genetic algorithms for reliability-based optimization of water distribution systems ", *Journal of Water Resources Planning and Management,* Vol.130, No. 1, pp.63-72, (2004).
14. Katiyar, V., "Production well operations optimization in water distribution system using genetic algorithm", (2007).
15. Korkana, P., Kanakoudis, V., Makrysopoulos, A., Patelis, M. and Gonelas, K., "Developing an Optimization Algorithm to form District Metered Areas in a Water Distribution System," *Procedia Engineering*, Vol.162, No. 3, pp.530-536, (2016).
16. Celi, C.L., Iglesias-Rey, P.L. and Solano, F.M., "Energy Optimization of Supplied Flows from Multiple Pumping Stations in Water Distributions Networks," *Procedia Engineering*, Vol.186, pp.93-100, (2017).
17. Lima, G.M., Brentan, B.M. and Luvizotto Jr, E., "Optimal design of water supply networks using an energy recovery approach", *Renewable Energy*, Vol. 117, pp.404-413, (2018).